Ferdowsi Civil Engineering, 37, 2, 2024. (25-50)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Experimental Study of the Mechanical Properties of Geopolymeric Mortars Containing Slag, Kaolin Powder, and Polymer

Research Article

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad[1], Arian Darvishalinezhad[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.79313.1185

1-Introduction

With the increase in environmental pollution, it is necessary to find suitable solutions to eliminate such risks. Among the pollutants, the carbon dioxide produced by the cement industry occupies a large part of air pollution. On the other hand, cement is the main component in concrete compositions. Therefore, researchers have investigated replacing materials with cement properties, such as the slag of the slag furnace, and pozzolans (e.g., fly ash, metakaolin, and natural pozzolans). When these compounds are used in the concrete structure, in addition to the environmental benefits, they also improve the mechanical properties and durability of concrete. When blast furnace slag is used as a percentage replacement of cement in the construction of concrete compounds, it is mainly associated with lower compressive strength in the early ages than normal concrete. To solve this problem, one of the new solutions is the alkaline activation of slag. Geopolymer concretes are concretes whose composition consists of two parts of base (containing aluminosilicate compounds) and activator materials. Therefore, natural and synthetic pozzolans can be used as a base material because they are rich sources of these compounds. Solutions with alkaline properties that activate the basic material are used as activators, which can be mentioned as sodium hydroxide, potassium hydroxide, sodium silicate, and sodium carbonate. In this research, geopolymeric concretes containing the slag of the blast furnace and kaolin powder were evaluated. According to the literature, this category of geopolymeric concretes have shown good performance. High compressive strength even at early ages, lower permeability, lower heat of hydration, good durability against chemical attacks and corrosive environments, and resistance to high temperatures are the advantages of this type of geopolymer concrete. However, operational disadvantages, such as relatively low efficiency, high shrinkage, formation of scale on the surface, alkaline reaction of aggregate, and variability of resistance have been mentioned for this type of concrete.

In geopolymer concretes, because the interaction of several different parameters affects the resistance, it is not as easy to predict the resistance as for ordinary concretes with portland cement. The limited number of studies on the mechanical properties of geopolymeric mortars necessitates the current investigation. In the structure of geopolymeric concrete, the adhesive paste is created from the combination of a base material and an activator solution, which can be considered an effective step to achieve the goals of sustainable development. The use of some minerals in concrete mixes will have an impact on improving the durability and mechanical characteristics. In the present research, the effect of three materials kaolin, blast furnace slag (GGBFS), and polymer butadiene styrene rubber (SBR) in molar 4 and 8 on the mechanical properties of geopolymer mortar was investigated.

2- Materials

The materials used for the desired test are sodium hydroxide (soda), sodium silicate (glass water), slag from the furnace, kaolin, SBR, and sand.

3-Experimental Program

Considering that the laboratory samples in this research are mortar type, a compressive strength test on cubic samples with dimensions of 50×50×50 mm^3 was performed based on the standard 109 ASTM C after 7, 28, and 90 days of curing in a water tank of about 24°C. The three-point bending strength test was performed according to the standard 293 ASTM C using samples with dimensions of 40×40×160 mm^3. Tensile testing of concrete was completed by indirect or Brazilian method based on the ASTM C standard 496. The penetration resistance method (ASTM C 403) was used to determine the initial and final setting times of concrete. A standard cylindrical sample (300 mm in height and 150 mm in diameter) cured for up to 28 days was used to calculate the modulus of concrete elasticity. A scanning electron microscope (SEM) microstructure test was performed on the 28-day fracture

*Manuscript received September 21, 2022, Revised January 16, 2024, Accepted April 30, 2024.

[1] Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email**: h.mosavi@guilan.ac.ir

[2] MS.c. Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

surface of the 4-50BSC sample containing 50% kaolin powder and 50% slag and SBR polymer. In Figure 1, the images of SEM for the 50-4BSC sample are presented.

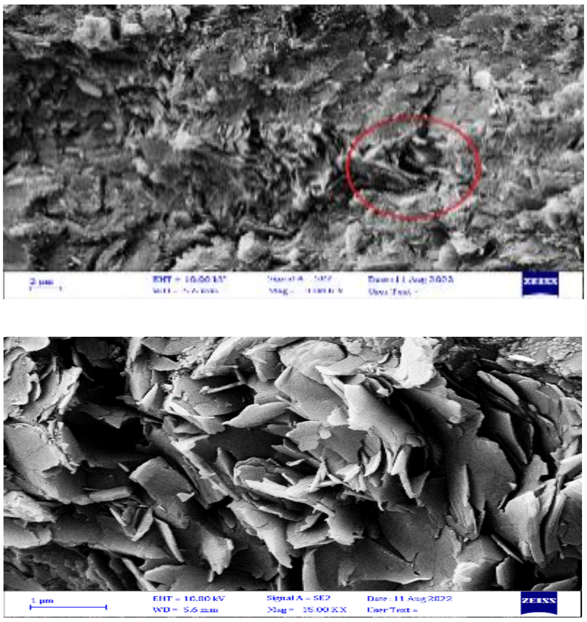


Figure 1: Scanning electron microscope photo of 50-4BSC sample

4- Conclusions

In the present research, by studying the effect of geopolymeric mortars based on kaolin and slag, individually and in combination, in different molar ratios, the following results were obtained:

1- The design sample of mixing 50% kaolin powder and 50% slag showed better compressive and bending strength compared to the design sample of mixing 75% kaolin powder with 25% slag.

2- The bending strength of both SC50-4 and BSC50-8 design samples was 4.43 MPa due to the use of polymer in the BSC50-8 sample. It indicates that the polymer did not influence the bending strength.

3- In samples with a combination of 50% kaolin ceramic powder and 50% slag, a higher tensile strength was observed compared to the design samples containing 75% kaolin powder and 25% slag except for the sample BSC50-4 in molar 4, which showed less resistance. The noteworthy point about the BSC75 design sample in the 4th and 8th molars is that the BSC75-8 design sample had a higher resistance than the BSC75-4 design sample even though SBR was used in both.

4- Increasing the replacement percentage of kaolin powder caused a drop in the modulus of elasticity so that by raising the replacement percentage of kaolin powder from 50% to 75% showed the modulus of elasticity (1.62 Gpa) in the sample BSC75-4. Moreover, a specific relationship was observed between the compressive strength and modulus of geopolymer concrete elasticity.

5- A comparison of the control sample of the mixing plan in the 8th molar revealed a better resistance than the 4th molar because the combination of sodium hydroxide with soluble sodium silicate provided a better activator. Sodium hydroxide solutions with a concentration of 8 M dissolve a larger amount of slag and provide a favorable modulus of elasticity.

6- According to the obtained results, the combination of kaolin and slag with an equal percentage is recommended compared to the control designs because 75% kaolin powder and 25% slag caused the mechanical properties of geopolymer mortar to drop.

7- SEM studies showed that the strength of adhesion between slag and kaolin powder played an important role in improving the mechanical properties of this concrete.

8- SEM evaluations indicated that samples containing 75% kaolin powder led to a more remarkable decrease in the mechanical properties of nanoparticles compared to the samples containing 50% kaolin powder due to the agglomeration of nanoparticles, which results from the accumulation of nanoparticles in this weight percentage.

9- The results of microstructural investigations obtained from SEM imaging on concrete samples were in line with the results of other tests in this research.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

مطالعهٔ آزمایشگاهی خواص مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره، پودر کائولن و پلیمر*

مقاله پژوهشی

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد(۱) آرین درویشعلی نژاد(۲)

DOI: 10.22067/jfcei.2024.79313.1185

چکیده *با توجه به میزان مصرف بالای ملات و بتن بویژه در سازه‌ها و نیاز روز افزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش قصد دارد تأثیر پودر سرامیک کائولن، سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی (GGBFS) و پلیمر استایرن بوتادین رابر را بر روی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری بررسی کند. در این تحقیق آزمایشگاهی از پودر کائولن و سرباره با درصدهای مختلف و پلیمر (SBR) استفاده شده است. به منظور دستیابی به اهداف نمونه های ۱۲ طرح اختلاط تحت آزمایش‌های مختلف نظیر مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش بتن (سوزن ویکات) و بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قرار گرفتند. استفاده از پودر کائولن در آزمایش های مقاومت فشاری و خمشی باعث افت مقاومت نمونه‌های ترکیبی شد؛ اما در آزمایش مقاومت کششی نمونه طرح اختلاط SC۵۰-۴ (۲/۷۹ Mpa) و نمونه طرح شاهد S۸ (۳/۰۸Mpa) نسبت به سایر نمونه طرح‌های اختلاط، مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند. زمان گیرش اولیه و نهایی کلیهٔ طرح های حاوی پودر کائولن در مولار ۴ بیشتر از مولار ۸ بود.*

واژه های کلیدی ملات ژئوپلیمر، سرباره، کائولن، مقاومت فشاری، خواص مکانیکی.

Experimental Study of Mechanical Properties of Geopolymeric Mortars Containing Slag, Kaolin Powder and Polymer

S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad A. Darvishalinezhad

Abstract *Considering the high consumption of mortar and concrete, especially in structures, and the increasing demand for cement production, it seems necessary to pay attention to the harmful environmental effects of this material. This research aims to investigate the effect of kaolin ceramic powder, blast furnace slag (GGBFS) and styrene butadiene rubber polymer on the mechanical properties of geopolymer concrete. In this laboratory research, kaolin powder and slag with different percentages as well as polymer (SBR) have been used. In order to achieve the goals, samples of 12 mixing plans were subjected to various tests such as compressive strength, flexure, tensile strength, modulus of elasticity, setting time of concrete (Vicot needle) and scanning electron microscope (SEM) microstructure examination. The use of kaolin powder in the compressive and flexural strength tests caused a decrease in the strength of the composite samples; However, in the tensile strength test, the SC50-4 mixing design sample (2.79 Mpa) and the S8 control design sample (3.08 Mpa) showed more resistance than other mixing design samples. The initial and final setting time of all designs containing kaolin powder in molar 4 was higher than molar 8.*

Keywords: Geopolymer Mortar, GGBFS, Kaolin, Compressive Strength, Mechanical Properties.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۳۰و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: h.mosavi@guilan.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مقدمه

با افزایش آلودگی‌های محیط زیست، یافتن راهکارهای مناسب برای رفع این گونه مخاطرات امری ضروری است. در میان آلودگی‌ها، آلودگی هوا و در میان آلاینده‌ها، کربن دی اکسید تولیدی ناشی از صنعت سیمان بخش بزرگی را به خود اختصاص می‌دهد. از سوی دیگر سیمان جزء اصلی در ترکیبات بتن محسوب می‌شود. از این رو پژوهشگران در زمینه جایگزین نمودن مواد با خاصیت سیمانی نظیر سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی، و پوزولانی مانند خاکستر بادی، متاکائولن، و پوزولان‌های طبیعی و ... تحقیق کرده‌اند. این ترکیبات هنگامی که در ساختار بتن به کار می‌روند، علاوه بر محاسن زیست محیطی، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز می‌شوند. هنگامی که سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در ساخت ترکیبات بتن به کار می‌رود، عمدتا با مقاومت فشاری کمتری در سنین اولیه نسبت به بتن معمولی همراه است [1,2]. برای حل این مشکل یکی از راهکارهای نوین فعالسازی قلیایی سرباره است. در واقع بتن‌های ژئوپلیمری بتن‌هایی هستند که ترکیب آنها از دو بخش ماده پایه (دارای ترکیبات آلومینوسیلیکاتی) و ماده فعالساز تشکیل شده است. بنابراین پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی از آنجا که منابع غنی از این ترکیبات هستند، می‌توانند به عنوان ماده پایه به کار روند. محلول‌ها با خاصیت قلیایی که موجب فعال شدن ماده پایه می‌شوند به عنوان ماده فعالساز مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و سدیم کربنات اشاره کرد. در این تحقیق بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی و پودر کائولن مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق تحقیقات انجام شده این دسته از بتن‌های ژئوپلیمری عملکردهای مطلوبی از خود نشان داده‌اند. مقاومت فشاری بالا حتی در سنین اولیه، نفوذپذیری کمتر، میزان حرارت هیدراتاسیون پایین‌تر، دوام مناسب در برابر حملات شیمیایی و محیط‌های خورنده و مقاومت در برابر دماهای بالا از امتیازات این‌گونه بتن‌های ژئوپلیمری هستند. البته معایب اجرایی نظیر کارایی نسبتا کم، جمع شدگی زیاد، ایجاد شوره در سطح، واکنش قلیایی سنگدانه و تغییرپذیری مقاومت برای این نوع بتن‌ها ذکر شده است. در واقع در بتن‌های ژئوپلیمری از آن جهت که اندرکنشی از چند پارامتر مختلف بر روی مقاومت تأثیر می‌گذارد، پیش‌بینی مقاومت به سهولت بتن-های معمولی با سیمان پرتلند نیست [3-6].

یکی از مسائلی که لزوم تحقیق به لحاظ محدود بودن تعداد مطالعات در آن زمینه احساس می‌شود، بررسی خواص مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری است. در ساختار بتن ژئوپلیمری خمیر چسباننده از ترکیب یک مادهٔ پایه و محلول فعالساز ایجاد می‌شود که می‌تواند گامی مؤثر برای دست‌یابی به اهداف توسعهٔ پایدار محسوب شود. استفاده از برخی مواد معدنی در مخلوط‌های بتنی نقش تأثیرگذاری بر بهبود مشخصات دوامی و مکانیکی خواهد داشت. در پژوهش حاضر به بررسی اثر سه ماده کائولن، سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی (GGBFS) و پلیمر بوتادین استایرن رابر (SBR) در مولار ۴ و ۸ بر خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری خواهیم پرداخت. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ژئوپلیمری انجام شده است که در اینجا به چند پژوهش مرتبط اشاره می شود:

یونشنگ و همکاران طراحی، ترکیب و خصوصیات ریزساختاری سیمان ژئوپلیمر بر پایهٔ کائولن کلسینه شده سیمان ژئوپلیمر پرداختند. آنها با مقایسه طیف IR9 خمیر دریافتند که سیمان Na-PSDS با بالاترین استحکام به طور کامل واکنش داده و دارای بیشترین مقدار ژئوپلیمر است. تجزیه و تحلیل میکروسکوپی نشان داد که سیمان Na-PSDS دارای ویژگی‌های ساختاری مشابه با طیف گسترده‌ای از Si است؛ اما چارچوب چهاروجهی SiO_4 تا حدی با Al_4 جایگزین شده است [7].

اوکی و همکاران به بررسی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر بر پایهٔ خاکستر بادی یا کائولن با فعال ساز قلیایی پرداختند و دریافتند که مقاومت فشاری با افزایش دما، زمان پخت و نوع فعال‌کننده‌های قلیایی افزایش می‌یابد. فوق روان‌کننده بر پایهٔ نفتالین سولفونات عملکرد بهتری نسبت به سایر فوق روان‌کننده-ها داشت. استحکام فشاری با افزودن ۱٪ فوق روان‌کنندهٔ نفتالین سولفونات در بتن ژئوپلیمری به ترتیب ۲۳/۳٪ و ۳۰/۹٪ بیشتر از ملامین فرمالدئید و پلی‌کربوکسیلات استر شد [8].

راماسامی و همکاران به بررسی رابطهٔ بین کائولن، نسبت مایع قلیایی و مقاومت ژئوپلیمر کائولن پرداختند. پژوهشگران دریافتند

که پوشش ژئوپلیمر کائولن روی چوب مطلوب‌ترین سختی و استحکام خمشی ۹۴/۷۳ مگاپاسکال را نشان می‌دهد [9].

مرمرداس و همکاران پژوهشی بر روی تأثیر سنگدانه‌های ریز بر خواص مکانیکی و جذب آب ملات‌های ژئوپلیمری با خاکستر بادی انجام دادند که ماسهٔ طبیعی، ماسهٔ شکسته و ترکیبی از این دو را برای ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده کردند. مطالعهٔ اندازه‌گیری میزان کارایی، مقاومت فشاری و جذب آب در نمونه-ها نشان داد که ملات‌ها با ماسهٔ طبیعی کارایی بهتر و نمونه‌ها با ماسهٔ شکسته مقاومت فشاری بیشتری داشتند در حالی که جذب آب نمونه‌ها با ماسهٔ ترکیبی کم‌ترین میزان بود [10].

شارما و همکاران در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایهٔ خاکستر بادی دریافتند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود. در رابطه با افزایش نسبت وزنی محلول فعال کنندهٔ قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر این نسبت تا ۰/۵، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [11].

پاتل و همکاران در مورد کارایی و خواص سخت شدهٔ بتن ژئوپلیمر خودتراکم در دمای محیط دریافتند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۲ مول در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و افزایش غلظت به بیش از ۱۲ مول سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود [12].

مطالعات مربوط به کارپذیری، مقاومت و دوام مخلوط‌های پایه سیمانی حاوی هر دو مواد الیاف پلاستیکی و پلیمر (پایه آبی) استایرن بوتادین رابر به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دهندهٔ بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، افزایش مقاومت خمشی و کاهش میزان نفوذ آب و مواد شیمیایی به درون مخلوط سخت شده است [13-15].

لئو و همکاران خواص مکانیکی و نفوذ پذیری بتن های سیمان پرتلند اصلاح شدهٔ با سه نوع پلیمر استایرن بوتادین رابر، پلی آکریلیک استر و سیلیکون آلی ضد آب را بررسی کردند و دریافتند که این پلیمرها، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد و خاکستر بادی اثر منفی آن را بهبود می‌بخشد. همچنین، این پلیمرها می‌تواند نفوذپذیری بتن را کاهش دهد [16].

یانگ کوگ با بررسی چسبندگی به سطوح زیرین ملات‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن وینیل اکریلیک استر در چهار شرایط عمل‌آوری مرطوب، خشک، استاندارد و تحت دمای بالا برای تعیین چسبندگی ملات‌های اصلاح شده به سطح زیرین خود دریافت که در شرایط استاندارد و شرایط عمل‌آوری خشک به ترتیب پلیمرهای اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن اکریلیک استر در مقایسه با سایر شرایط عمل‌آوری نتایج بهتری داشته‌اند [17].

چهرازی و همکاران در بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط پایه سیمان پرتلند اصلاح شده با اتیلن وینیل استات، استایرن اکریلیک و استایرن بوتادین دریافتند که خواص دوام با استفاده از مواد پلیمری بهبود می‌یابد و پلیمر اتیلن وینیل استات نسبت به پلیمر استایرن اکریلیک با نسبت ۵٪ به ۱۵٪ خواص مکانیکی و دوام را به مراتب بیش از پلیمر استایرن اکریلیک بهبود می‌بخشد [18].

متالکه و همکاران به مطالعهٔ بهبود خواص مکانیکی ژئوپلیمر کائولن با استفاده از هیدرو اکسید سدیم و اکسید کلسیم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن ۵٪ وزنی هیدروکسید سدیم و ۱۰٪ وزنی اکسیدکلسیم، مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر را در دمای اتاق به ترتیب ۹۰٪ و ۱۰۵٪ افزایش می‌دهد. افزودن ۵٪ وزنی هیدروکسید سدیم با ۱۰٪ وزنی اکسیدکلسیم نیز پایداری آب ملات ژئوپلیمر را تا حدود ۱۲۰٪ بالا می‌برد [19].

جنبهٔ نوآوری این پژوهش وجود کائولن و پلیمر بوتادین استایرن رابر (SBR) در خمیر ملات ژئوپلیمری است که با توجه به بررسی تحقیقات پیشین، تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه انجام نشده است. پژوهش حاضر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری با درصدهای ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در مولار ۴ و ۸ در سنین عمل-آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر پایه سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی را بررسی می‌کند. در این راستا از سرباره (GGBFS) و کائولن به عنوان مواد اولیهٔ ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شد. ۱۲ نوع طرح اختلاط با درصد های ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰

روزه ساخته شد و تأثیر آن بر مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش و ریزساختار ملات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش و بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی در سن ۲۸ روز تعیین شد.

مصالح مورد استفاده

م صالح مورد ا ستفاده برای آزمایش مورد نظر عبارتند از: سدیم هیدروکسید (سود)، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی، کائولن، پلیمر بوتادین استایرن رابر(SBR) و ماسه.

سدیم هیدروکسید (سود)

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH مادهای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۳۱۸°C و چگالی ۲/۱۳ $g/_{cm^3}$ است. در این پژوهش از محلول سود ۴ و ۸ مولار برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده شد.

سدیم سیلیکات (آب شیشه)

سدیم سیلیکات یا آب شیشه نام عمومی ترکیب سدیم متاسیلیکات (Na_2SiO_3) است که به صورت محلول آبی و جامد در دسترس است. سدیم سیلیکات طبق تعریف فون وگنر نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است [20]. براساس استاندارد ۸۹– ASTM C۱۸۸ چگالی پودر این ماده برابر ۲/۴ $g/_{cm^3}$ اندازه-گیری شد و میانگین چگالی محلول مورد استفاده نیز برابر ۱/۶ $g/_{cm^3}$ به دست آمد. در جدول (۲) مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی آمده است.

جدول ۱ مشخصات هیدروکسید سدیم

درصد خلوص	حلالیت	انحلال پذیری در آب	اسیدی	دمای ذوب °C	دمای جوش °C	چگالی $g/_{mol}$	جرم مولی $g/_{mol}$	فرمول شیمیایی
۹۸–۹۹٪	در آب ، اتانول و متانول محلول است	۲۰	۱۳	۳۱۸	۱۳۸۸	۲/۱۳	۳۹/۹۹۷	هیدروکسید سدیم (NaOH)

جدول ۲ مشخصات سیلیکات سدیم

مشخصات	محلول سیلیکات سدیم
فرمول شیمیایی	Na_2SiO_3
وزن مولکولی	۱۲۲/۰۶ $gr/_{mol}$
دانسیته	۲/۶۱ $gr/_{cm^3}$
نقطهٔ ذوب	۱۰۸۹ °C
حلالیت درآب	۲۲/۲ gr/۱۰۰ mol (۲۰°C) ۱۶۰/۶ gr/۱۰۰ mol (۸۰°C)
ضریب شکست	۱/۵۲
انحلال‌پذیری	نامحلول در الکل

سرباره

برای ساخت ژئوپلیمرها از سه جزء استفاده می‌شود: جزء اول ماده آلومیناسیلیکاتی به عنوان مادهٔ پایه، جزء دوم سدیم سیلیکات و جزء آخر ماده قلیایی است. در این پژوهش از سرباره به عنوان مادهٔ پایه و از پودر سدیم سیلیکات با نسبت‌های مشخصی با آب ترکیب شده و محلول ساخته شده از پودر سدیم هیدروکسید به عنوان مادهٔ قلیایی استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول (۳) و (۴) آمده است.

کائولن

کائولن از نظر صنعتی به رس‌هایی اطلاق می‌شود که دارای مقدار قابل توجهی کائولینیت باشند. از نظر کانی شناسی کائولن جزء گروهی از کانی‌های سیلیکات‌های آلومینیوم هیدراته است و کائولینیت، دیکیت، ناکریت، هالویزیت، متاهالویزیت و خاک-نسوز را شامل می‌شود. چسبندگی یکی دیگر از خواص مهم فیزیکی کائولن است که با درجهٔ خلوص آن نسبت مستقیم دارد. یعنی هر چه میزان چسبندگی در کائولن بیشتر باشد به همان نسبت درجهٔ خلوص آن نیز افزایش می‌یابد. پودرکائولن استفاده شده در این آزمایش‌ها با نیازهای مختلف در صنایع خاصیت انطباق‌پذیری بالایی دارد. هم اکنون از آن در ۹۰٪ کارخانجات تولید آجر اصفهان برای تولید آجر نسوز نما در رنگ‌های کرم تا شاموتی استفاده می‌شود. رنگ کلوخهٔ این ماده، کرم تا زرد و رنگ پودر آن، سفید مایل به کرم است. با توجه به رنگ روشن کائولن این ماده می‌تواند در معماری دارای جذابیت‌هایی باشد. مشخصات فیزیکی پودر کائولن در جدول (۵) و ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF در جدول (۶) آمده است.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی پودر سرباره (https://www.iranslag.com)

نمونه	نرمی بلین CM^2/gr	درصد فاز آمورف	درصد باقی روی الک نمرهٔ ۵۰	درصد باقی روی الک نمرهٔ ۳۰
سرباره پودر شده	۳۵۰۰	۸۷	۱۴	۲۷

جدول ۴ آنالیز شیمیایی سرباره (http://www.aryapowder.ir)

نمونه	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	SO_3
سرباره (٪)	۳۶/۰	۰/۶۰	۳۸/۱۰	۶/۶	۱۳/۰۰	۰/۵۰	۱/۱۰	۰/۶۰

جدول ۵ مشخصات فیزیکی پودر کائولن

آزمایش فیزیکی	استحکام خشک	انقباض خشک	استحکام پخت	دمای کوره	سیکل کوره	انقباض پخت	جذب آب	ویسکوزیته دوغاب	دانسیته دوغاب	ضریب انبساط حرارتی
پودر کائولن	۲۰/۳۵	۰/۶۷	۴۵۴	۱۱۵۵ °C	۶۵ دقیقه	۶/۵	۸/۳	۱۶	۱/۶۰	۷۶

جدول ۶ آنالیز شیمیایی کائولن

نمونه	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	Fe_2O_3	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3	LOI
کائولن (٪)	۷۰/۸۳	۱۹/۱۴	۰/۳۸	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۱۳	۰/۹۳	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۹۱	۵/۵۲

پلیمر

در حالت کلی به کوپلیمر استایرن و بوتادین (میزان بوتادین باید بیشتر از ۵۰٪ باشد) SBR گفته می‌شود. نسبت معمولی مونومرها ۷۰٪ تا ۷۵٪ بوتادین به ۲۵٪ تا ۳۰٪ استایرن است. هر چقدر میزان استایرن (SBR) به کار رفته در مخلوط از۵۰٪ بیشتر باشد محصول به پلاستیک شدن می‌رود و در تولید لاتکس کاربرد پیدا می‌کند. (SBR) به عنوان پلیمر کارایی بسیاری دارد و جزو پر مصرف‌ترین لاستیک‌ها در صنعت به شمار می‌آید. خواص مکانیکی SBR از NR (لاستیک طبیعی) پایین‌تر است و مانند آن بر اثر کشش بلوری نمی‌شود. استفاده از (SBR) در بتن مقاومت فرسایشی بالایی دارد. هر چه میزان سیس و وینیل بوتادین بیشتری در آن ترکیب شود، مقاومت فرسایشی (SBR) بیشتر افزایش می یابد. جهندگی خوب، انعطاف‌پذیری در دمای پایین، مقاومت در برابر سایش و ترک‌خوردگی و حرارت و ضربه از دیگر ویژگی‌های آن هستند. در این پژوهش از (SBR) به منظور مقاومت در مقابل آب استفاده شده است. در پژوهش حاضر از مادهٔ پلیمری استایرن بوتادین رابر که از نوع پلیمر الاستومری محسوب می‌شود، استفاده شده است که به صورت لاتکس بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۸) آمده است.

ماسه

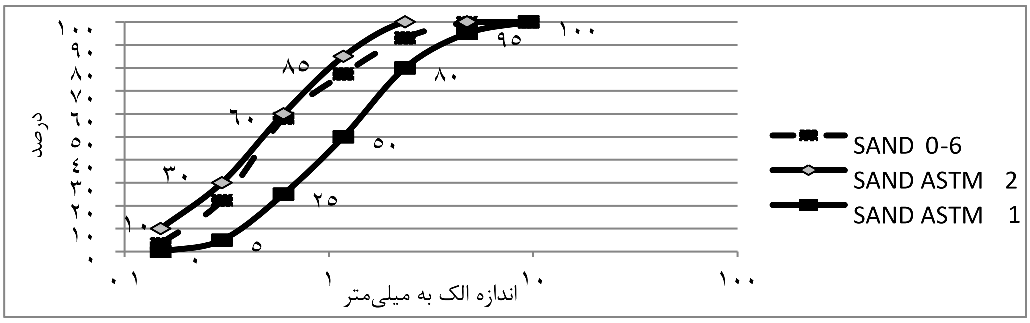
سنگدانه به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی در ملات و بتن شناخته می‌شود. سنگدانه نه تنها به عنوان مادهٔ پرکننده در مخلوط بلکه به عنوان یکی از اجزای اصلی تأثیر چشم‌گیری بر خواص محصول نهایی خواهد داشت. در پژوهش حاضر ماسهٔ رودخانه‌ای و گردگوشه که از معدن آسمان‌رود رودسر تهیه شده برای ساخت ملات ژئوپلیمری به کار گرفته شد. ماسه مصرفی با بزرگترین اندازه اسمی ۴/۷۵ mm در جدول (۷) مشاهده می‌شود. شکل (۱) نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مصرفی

لزجت معلق در آب	درصد جامد	ظاهر	چگالی	pH	اندازهٔ ذرات	نام
۸۰۰-۳۰۰Mpa.s	۵۰±%۱	مایع سفید رنگ	۱/۰۱ g/cm^3	۹-۷	۱۵۰μm	استایرن بوتادین رابر

جدول ۸ مشخصات فیزیکی ماسه

آزمایش فیزیکی	ماسه (۴/۷۵ mm)
وزن مخصوص (در حالت اشباع با سطح خشک SSD)	۲۶۱۱ Kg/m^3
جذب آب (٪)	٪۲,۴



شکل ۱ منحنی دانه بندی ماسه مصرفی بر اساسASTM C۳۳ [21]

طرح مخلوط‌های ساخته شده با کائولن و سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی (GGBFS)

در جدول (۸) طرح اختلاط‌های مختلف برای ماده کائولن بر اساس تجربیات مندرج در مرجع شماره [22,23] تعیین گردید و از همین نتایج و مرجع [24,25] برای تعیین مقدار سرباره، برای رسیدن به طرح اختلاط نهایی استفاده شد. نام گذاری نمونه‌ها به این شرح است: S نشانگر سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی، CP پودر سرامیک کائولن، SBR پلیمر استایرن بوتادین رابر، BS پودر چسباننده جامد، SH با فرمول شیمیایی NaOH، SS برگرفته از Sodium Silicate، SBR برگرفته از Styrene Butadiene Rubber و اعداد بعدی به ترتیب مولاریته و درصد پودر کائولن است.

در جدول (۹) طرح اختلاط، وزن ماسهٔ مورد استفاده با توجه به واکنش‌پذیری بالای سرباره و میزان‌ریزی آن $1195\ Kg/m^3$ در نظر گرفته شد. از آنجا که مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن بسیار پایین بود و با افزودن مقدار کائولن در طرح اختلاط نیز در افزایش مقاومت فشاری تغییری حاصل نشد؛ درصد کائولن با سرباره یکسان در نظر گرفته شد. در طرح اختلاط استفاده شده از سرباره با ثابت نگه داشتن مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بهتری به دست آمد. در نهایت نمونهٔ شمارهٔ ۱ در مولار ۴ و نمونهٔ شمارهٔ ۴ در مولار ۸ انتخاب شد. دلایل انتخاب این طرح اختلاط از بین تمام نمونه‌ها به عوامل زیر بستگی داشت:

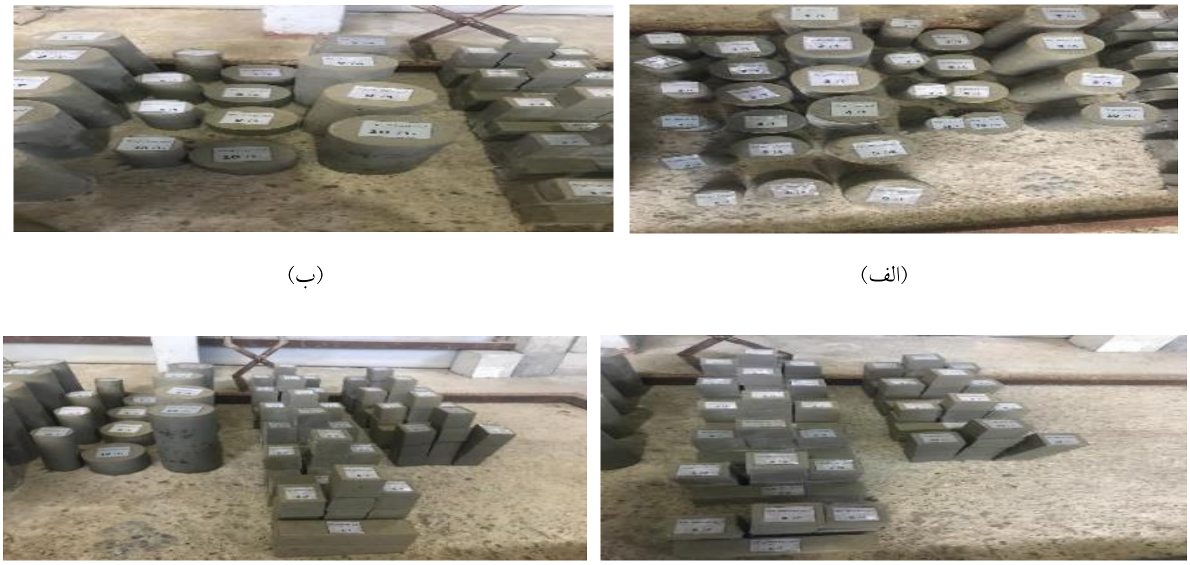
۱- تخلخل. ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات. ۳- میزان چسبندگی. ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط‌های ملات. برای مثال در نمونه طرح ۳ و ۶، تخلخل نمونه‌ها به طور محسوسی با بقیه طرح اختلاط‌های سرباره، تفاوت فاحشی داشت. به طور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسهٔ طرح اختلاط‌ها با هم نقش مهمی دارد و علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاط‌های معیوب به دلیل رئولوژی نامناسب است.

روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

برای دست‌یابی به اهداف مورد نظر در این پژوهش، ۱۲ طرح از ملات ژئوپلیمری ساخته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم مولار ۴ و ۸ دسته‌بندی شدند و برای هر کدام یک طرح شاهد (Ctrl) فاقد پودر کائولن در نظر گرفته شد. ملات به دست آمده را در سه مرحله درون قالب‌های آغشته به روغن ریخته و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام شد. با توجه به نوع قالب‌های مورد استفاده با چند آزمون و خطای اولیه در ملات تازه تخلخل زیادی مشاهده گردید که دلیل آن چسبندگی بالای ملات به دیوارهٔ قالب بود. به کمک دستگاه ویبره حباب‌های هوای محبوس در داخل و اطراف قالب تا حد ممکن خارج شد. در انتها طبق شرایط عمل‌آوری یکسان قالب‌ها در گرم‌خانه قرار گرفت. جزئیات مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹ طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

Name	BS	Slag		CP		M	Na_2SiO_3	NaOH	SS + SH/BS	SS/SH	SBR		Sand
	Kg/m۳	%BS	Kg/m۳	%BS	Kg/m۳	Mol/L	Kg/m۳	Kg/m۳			%BS	Kg/m۳	Kg/m۳
S۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
S۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
BS۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BS۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵



(الف) (ب)

(ج) (د)

شکل ۲ نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی و کائولن

برنامه آزمایش‌ها

آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به این که نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از نوع ملات هستند؛ آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر، بر اساس استاندارد [26] ASTM C۱۰۹ و پس از عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب با دمای حدود ۲۴°C در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. به منظور انجام این آزمایش نمونه پس از عمل‌آوری تا سن مورد نظر از حوضچه خارج شده و پس از خشک نمودن سطح نمونه، داخل دستگاه جک فشاری برای شروع آزمایش قرار می‌گیرد تا در اثر نیروی فشاری قائم که از سوی جک فشاری با سرعتی ثابت اعمال می‌شود، گسیخته شود. پس از گسیخته شدن نمونه نیروی فشاری ماکزیمم توسط دستگاه ثبت می‌شود. عدد ثبت شده در لحظه شکست توسط گیج دستگاه به عنوان مقدار بار فشاری P در رابطهٔ زیر قرار داده می‌شود. تنش فشاری مکعبی حاصل مطابق رابطه (۱) با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه به دست می‌آید. شکل (۳) لحظهٔ شکست نمونه را نشان می‌دهد.

$$f=\frac{P}{A} \qquad (۱)$$

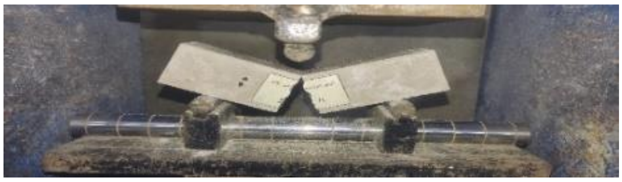
در رابطهٔ (۱) f، مقاومت فشاری (MPa)؛ P، نیروی حداکثر فشاری (N)؛ A، سطح مقطع بتن (mm^2) است.



شکل ۳ مقاومت فشاری نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از کائولن و سرباره

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد [27] ASTM C۲۹۳ به کمک نمونه‌هایی با ابعاد ۱۶۰ × ۴۰ × ۴۰ میلی‌متر انجام پذیرفت. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل (۴) قابل مشاهده است هر نمونه را در دو لایه قالب‌گیری و هر لایه را به کمک میز لرزان متراکم کردیم. تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۱۲ نمونه است که در سن ۲۸ روز شکسته شد. نرخ بارگذاری برابر با Mpa/Sec ۰/۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴ مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از کائولن و سرباره

آزمایش کشش برزیلی یا شکافت استوانه‌ای

آزمایش کشش بتن به روش غیر مستقیم یا برزیلی براساس استاندارد ASTM C۴۹۶ انجام می‌شود [26]. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل (۵) قابل مشاهده است. نمونه‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد ASTM C۱۹۲ [27] ساخته و نگهداری می‌شود. نمونه‌ها طوری بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد. سپس بار افزایش می‌یابد تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید. بارگذاری به صورت مداوم و با سرعت یکنواخت اعمال می‌شود تا تنش کششی موجب گسیختگی نمونه شود.



شکل ۵ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش کشش برزیلی

آزمایش زمان گیرش بتن (سوزن ویکات)

از روش مقاومت در برابر نفوذ [29] (ASTM C ۴۰۳) برای تعیین زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن استفاده شده است. در این روش پس از ساختن بتن با استفاده از الک نمره چهار سنگدانه‌های درشت آن جدا می‌شوند. این آزمایش بر اساس مقادیری در برابر نفوذ یک میلهٔ فولادی به اندازه ۲±۲۵ میلی‌متر در خمیر استوار است. طبق تعریف وقتی که مقادیر مقاومت خمیر در برابر نفوذ به ترتیب به ۳/۵ و ۲۷/۶ مگاپاسکال برسند، گیرش‌های اولیه و نهایی حاصل می‌شود. البته زمان‌های گیرش را می‌توان با استفاده از روش سوزن ویکات عنوان شده در آیین‌نامهٔ انگلستان (BS ۴۵۵۰) و یا آیین‌نامهٔ آمریکا (ASTM C ۱۹۱) و یا سوزن گیلمور (C ۲۶۶ ASTM) نیز تعیین کرد. اما روش‌های فوق برای بتن چندان مناسب نیستند، چرا که نسبت آب به مصالح سیمانی به کار رفته در این روش‌ها با این نسبت در بتن متفاوت است [28]. تنها شیوهٔ استاندارد روش مقاومت در برابر نفوذ است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل (۶) قابل مشاهده است.



شکل ۶ گیرش نمونه آزمایشی تحت آزمایش ویکات

آزمایش مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته بتن خاصیتی از بتن است که با ضریب زاویه یا برابر با تانژانت منحنی تنش-کرنش (تغییر طول نسبی) بتن می‌باشد. برای محاسبه ضریب ارتجاعی بتن یا همان مدول الاستیسیته از نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد (ارتفاع ۳۰ و قطر ۱۵سانتی‌متر) و عمل‌آوری شده تا سن ۲۸ روزه استفاده می‌شود. مطابق با شکل (۷) برای انجام این آزمایش ابتدا استوانهٔ بتنی را درون دو حلقهٔ فلزی که فاصلهٔ عمودی آنها از یک‌دیگر ۱۵۰ میلی‌متر است قرار داده شد و در آن کرنش‌سنجی تعبیه شد. سپس به همراه استوانهٔ قائم در زیر دستگاه فشار قرار داده شد. با محاسبهٔ نیروی متناظر تنش در محدوده ارتجاعی بتن، تعداد دورهای کرنش‌سنج پس از رسیدن عقربهٔ دستگاه به نیروی محاسبه شده قرائت گردید و سپس در عدد ۰/۰۰۲ ضرب شد تا بدین ترتیب تغییر طول نمونه بین دو نوار فلزی که به فاصله ۱۵۰mm از یک‌دیگر است، به دست آید. برای به دست آوردن کرنش متناظر در

محدودهٔ ارتجاعی بتن، تغییر طول نمونه بین دو نوار فلزی به فاصلهٔ اولیه آن (۱۵۰mm) تقسیم می‌شود. با تقسیم تنش اعمال شده به کرنش به دست آمده مدول الاستیسیته بتن محاسبه می‌شود. محدودهٔ تنش خطی بتن به صورت $f_c' < 0.4 \times F'_c$ تعریف می‌شود، که درآن F'_c مقاومت فشاری نهایی و f_c' تنش متناظر با $0/۴\ F'_c$ بتن است. این روش استاندارد توسط ASTM C ۴۶۹ [30] پیشنهاد شده است.



شکل ۷ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مدول الاستیسیته

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)

این میکروسکوپ یکی از روش‌های تولید تصاویر به وسیلهٔ روبش یک پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه است. توسط این روش تصاویر سه بعدی از ساختار نمونه به دست می‌آید. در SEM نمونه با پرتو الکترونی باریکی به قطر ۱۰۰ آنگستروم بمباران می‌شود. در اثر برخورد پرتوهای الکترونی به نمونه، الکترون‌های ماده برانگیخته می‌شوند و در هنگام بازگشت به مدار اصلی خود به شکل پرتو الکترونی از سطح نمونه منتشر شده و توسط یک آشکارساز جمع‌آوری و آنالیز می‌شوند. این پرتوهای برگشتی از نمونه برای مشخصه یابی خواص مختلفی از ماده از قبیل: ترکیب شیمیایی، پستی و بلندی سطح، کریستالوگرافی، خواص الکتریکی و مغناطیسی و غیره به کار می‌روند. با هدف از تصویربرداری برای بررسی ریزساختار ملات استفاده شده است [31].

بحث و بررسی نتایج

نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی حاوی ملات ژئوپلیمری پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت با دمای اون ۱۱۰°C عمل‌آوری شد. آزمونه‌ها پس از قالب‌برداری در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری آنها با قرار دادن در ستگاه بتن شکن به د ست آمد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سنین مختلف در شکل (۸) آمده است.

بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه نشان می‌دهد در نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید با غلظت مولار۴، جایگزینی پودر کائولن با سرباره در تمام درصدهای وزنی باعث کاهش مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری شد. افزایش غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم در مخلوط ملات ژئوپلیمری باعث افت مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ روز) برای تمامی نمونه‌ها شده است. بیشترین اثرگذاری ناشی از افزایش غلظت هیدروکسید سدیم به طرح SC۷۵ مربوط بود؛ به طوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از مولار ۴ به ۸ باعث افت ۲۵٪ مقاومت فشاری ۷ روزه برای این نمونه طرح شده است.

مقاومت فشاری (MPA)	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
7 روزه	۱۵/۵۹	۱۱/۵۹	۹/۲۶	۲۵/۱۹	۱۰/۵۱	۶/۹۵	۱۰/۶۸	۹/۸۵	۸/۲۹	۱۸/۱۶	۹/۱۱	۷/۱۷
28 روزه	۲۴/۵۹	۱۶/۲۵	۱۳/۹۱	۳۶/۵۹	۲۰/۰۱	۱۱/۴۲	۲۱/۱۲	۱۵/۸۸	۱۲/۱۳	۳۲/۲۳	۱۶/۳۵	۹/۹۶
90 روزه	۴۱/۳۹	۲۱/۲۹	۱۲/۷۷	۵۰/۴۵	۲۳/۵۴	۹/۹۴	۳۰/۸۴	۱۹/۱۳	۱۲/۸۳	۳۸/۰۵	۲۰/۱۹	۱۰/۲۴

شکل ۸ مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ملات های ژئوپلیمری

بررسی افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در نمونه های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن و مقایسهٔ آن با نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن بر بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه، اثرگذاری کمتری را نشان داد؛ به طوری که میزان کاهش مقاومت برای طرح‌هایی با جایگزینی ۷۵٪ پودر کائولن به طور میانگین به ۱۹/۵٪ رسید؛ اما این عدد برای نمونه‌هایی با جایگزینی ۵۰٪ پودر کائولن ۸٪ بود. دلیل این امر مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن است که واکنش ژئوپلیمراسیون ایجاد نکرده و باعث خودخشکیدن بتن شده است. به عبارت دیگر کائولن آب مورد نیاز بتن را جذب کرده و آب کافی برای انجام واکنش هیدراسیون از بین رفته است [32].

با توجه به شکل (۸) بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز نشان داد که مقاومت نمونه‌ها با مولار ۴ و ۸ نسبت به طرح شاهد افت داشته است. نمونه طرح SC۵۰-۸ در مقایسه با نمونهٔ شاهد S۴ نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد مطلوبی را از خود نشان داد. در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره، افزایش غلظت سدیم هیدروکسید سبب بهبود عملکرد نمونه‌ها گردید؛ به طوری که باعث رشد ۱۹٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه در این طرح‌ها شد. دلیل احتمالی ممکن است از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار باشد که مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت فشاری بهتری را ارائه می‌کند.

نتایج ارائه شده در شکل (۸) نشان داد که افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز، باعث افت مقاومت فشاری در نمونه‌هایی با جایگزینی پودر کائولن و سرباره نسبت به طرح شاهد می‌شود. برای مثال در طرح SC۵۰-۸ مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد S۴ حاصل شد. در میان نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن نسبت به طرح شاهد S۴، افت مقاومت فشاری ۵۷٪ را نشان داد. علت آن میتواند ناشی از مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن است که باعث خودخشکیدن بتن شده است [32].

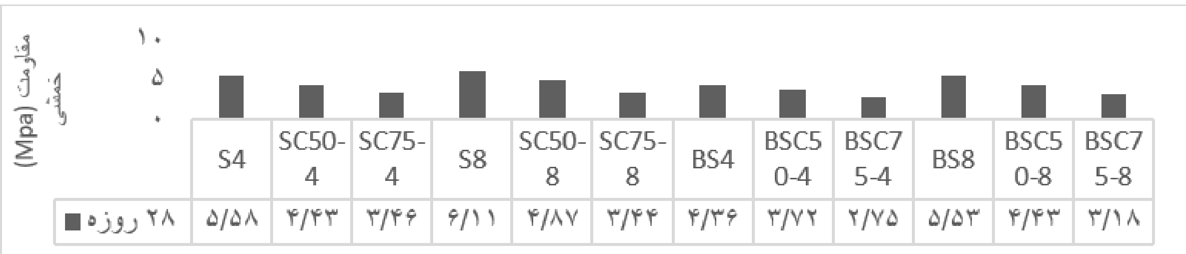
مطالعهٔ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان داد که جایگزینی پودر کائولن با سرباره در درصدهای وزنی مختلف اثر مستقیم بر نتایج مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری دارد؛ چنانکه در تمام سنین برای نمونه طرح‌ها جایگزینی ۵۰٪ پودر کائولن با سرباره باعث افت عملکرد می‌شود و افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن در نمونه‌ها باعث افت مقاومت فشاری می‌گردد. بررسی نتایج نشان داده‌اند که غلظت محلول هیدروکسید سدیم از دیگر پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری بوده است. این موضوع به ویژه در نتایج مربوط به مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز قابل توجه بود؛ به طوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از مولار۴ به ۸، سبب شد مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه طرح SC۵۰-۸، ۲۰٪ افزایش یابد؛ اما این مقدار برای سن ۹۰ روزه ۱۰٪ به دست آمد. زیرا افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم باعث افزایش روند مقاومت فشاری زودرس می‌شود؛ دلیل این امر احتمالا ناشی از افزایش میزان انحلال و در نتیجه تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون است.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

بررسی نتایج به دست آمده از شکل (۹) مربوط به آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت خمشی به نمونه طرح شاهد در مولار ۸ و کمترین مقاومت خمشی به نمونه طرح BSC۷۵-۴ مربوط می‌شود. در دو نمونه طرح اختلاط شاهد، نمونهٔ طرح شاهد در مولار ۸ بیشترین مقاومت خمشی را از خود بروز داد. در آزمایش دو نمونه طرح SC۴-۵۰ و BSC۵۰-۸ نکتهٔ جالبی به این شرح حاصل شد. به کار بردن پلیمر بوتادین استایرن رابر در نمونه BSC۵۰-۸ و ۵۰٪ پودر سرامیک کائولن و ۵۰٪ سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی، مقاومت خمشی هر دو نمونه عدد ۴/۴۳ مگاپاسکال بود. مقایسهٔ این دو نمونه طرح در آزمایش مقاومت خمشی، مقاومت یکسانی را به ما نشان داد. یکی از دلایل اصلی در کاهش مقاومت خمشی نمونه طرح BSC۵۰-۸ این است که لاتکس (SBR) باعث ایجاد حباب هوا در ساختار ملات ژئوپلیمری می‌شود و همین امر سبب تخلخل بیشتر در ملات و کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. همچنین کاربرد پلیمر در ملات، فرآیند هیدراسیون را به تعویق می‌اندازد و مقاومت خمشی را نیزکاهش می‌دهد. مواد پلیمر به

دلیل داشتن سورفکتنت در ساختار خود به منظور ممانعت از کلوخه شدگی ذرات و افزایش روانی، سبب حباب‌سازی در ریز ساختار ملات تازه می‌شوند. با تراکم نمونه‌ها توسط میز لرزان، بخشی از این حباب کاسته می‌شود و بخش باقی ماندهٔ آن به عنوان تخلخل ریز ساختاری می‌تواند سبب کاهش مقاومت خمشی شود. در ارتباط با علت تفاوت میزان مقادیر مقاومت خمشی پلیمر مصرفی نیز می‌توان گفت که نحوهٔ پلیمریزاسیون آنها در ساختار مخلوط‌ها، اندازهٔ ذرات پلیمرها و نوع حالت (سختی و نرمی) پلیمرها پس از انجام پلیمریزاسیون در ساختار مخلوط‌های سخت شده از جمله عللی هستند که می‌توانند بر میزان مقاومت خمشی آزمونه‌های ژئوپلیمری مورد مطالعه تأثیر مستقیم داشته باشند.

در نمونه BSC۷۵-۴ به دلیل استفاده از پلیمر و ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره در مولاریته ۴ کمترین مقاومت خمشی نسبت به بقیه نمونه‌های طرح اختلاط مشاهده گردید؛ در حالی که در نمونه طرح BSC۷۵-۸ با توجه به استفاده از پلیمر و ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ سرباره در مولار ۸ مقاومت خمشی بهتری نسبت به نمونه طرح BSC۷۵-۴ حاصل شد. دلیل این امر ترکیب محلول سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات بود. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت مولار ۸ ، بیشترین مقدار ماده را از پیش منبع در خود حل کرده و بیشترین مقدار مقاومت خمشی را ارائه می‌کند. در مقایسهٔ دو نمونه طرح شاهد S۴ و BS۸ با توجه به استفاده از مواد چسبانندهٔ جامد در نمونهٔ BS۸، مقاومت خمشی تقریبا یکسانی وجود داشت. دلایل این امر وجود مواد چسبانندهٔ جامد در نمونه طرح BS۸، چسبندگی عالی خمیر ژئوپلیمر به ذرات سنگدانه، شکنندگی قابل توجه ژئوپلیمر و مقدار ماسه در ملات بود که بر مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمر تأثیرگذار بودند [33]. در دو نمونه طرح SC۷۵ در مولار ۴ و ۸ با توجه به استفاده از ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره، مقاومت خمشی تقریبا یکسانی مشاهده شد. دلیل این امر به مقدار اضافی کائولن بتن در ملات ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ پودر کائولن مرتبط بود که واکنش ژئوپلیمریزاسیون نداده و باعث خودخشکیدن بتن شد. بدین معنا که آب مورد نیاز بتن جذب شده و آب لازم را برای انجام واکنش از دست داده بود [32]. با توجه به استفاده از مواد چسبانندهٔ جامد در نمونه طرح BS۴ و مقایسهٔ آن با نمونه طرح SC۵۰-۸، نمونهٔ دوم که ترکیبی از ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره بود، مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه شاهد از خود به روز داد. دلیل آن را می‌توان در طرح ترکیبی کائولن و سرباره و اثر منفی کائولن بر روی مقاومت خمشی جستجو کرد؛ به طوری که در سن ۲۸ روز واکنش پوزولانی کائولن و سرباره و تولید ژل C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) باعث افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره شده است؛ ولی نسبت به نمونه طرح شاهد، مقاومت خمشی کمتری داشته است. در نهایت با توجه به شکل (۹) در آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه SC۵۰-۸ در مولار ۸ نسبت به بقیه نمونه‌های ترکیبی، مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد.



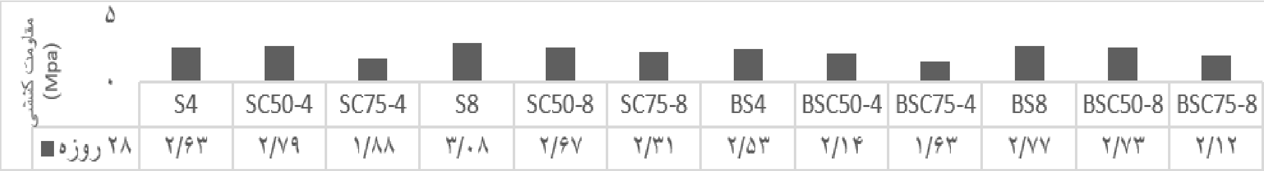
شکل ۹ مقاومت خمشی سه نقطه‌ای ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی

نتایج آزمایش کشش به روش برزیلی یا دو نیم شدن

نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰×۱۰ cm ملات ژئوپلیمری پس از قالب-ریزی به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه عمل‌آوری شدند. پس از قالب‌برداری و نگهداری در محیط آزمایشگاه در سن ۲۸ روز شکست برزیلی روی آنها انجام گرفت. نتایج شکل (۱۰) نشان می‌دهد کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح BSC۷۵-۴ و بیشترین مربوط به نمونه طرح S۸ است. علت آن را باید در طرح ترکیبی ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ سرباره و پلیمر (SBR) جست زیرا پودر کائولن و پلیمر بر روی مقاومت کششی اثر منفی داشت. علت دیگر این مسئله ممکن است به نوع پلیمر (حالت ارتجاعی پلیمر پس از پلیمریزاسیون در ساختار مخلوط) و تا حدودی به ابعاد ذرات پلیمر بستگی داشته باشد؛ به طوری که هر چه ابعاد ذرات پلیمر بزرگ‌تر باشد، می‌تواند فیلم‌های گسترده‌تری را در ساختار مخلوط‌های ژئوپلیمری تشکیل دهد. مطابق شکل افزودن پودر سرامیک کائولن به ملات ژئوپلیمری سبب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود بیشینهٔ مقاومت کششی به نمونه طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک کائولن (۴-SC۵۰، ۸-BSC۵۰ و ۸-SC۵۰) مرتبط است. به طور کلی خواص مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری وابستگی زیادی به نسبت $SiO_۲/Al_۲O_۳$ دارد. با افزایش این نسبت، میزان حلالیت یون‌ها و فرآیند پلیمریزاسیون افزایش می‌یابد که این امر سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود [34]. به عبارت دیگر با افزودن پودر سرامیک کائولن، $SiO_۲$ فعال بیشتر می‌شود و این امر سبب ایجاد پیوندهای سیلیکونی (Si-O-Si-O-Si-O) می‌گردد. این پیوند زنجیری شکل تمامی اجزای بتن را در کنار یک‌دیگر نگه می‌دارد و یک ترکیب پیوسته ایجاد می‌کند. ضمنا نرمی بالای ذرات کائولن و شکل کروی آنها با پر کردن خلل و فرج بتن، سبب ایجاد ساختار متراکم‌تری در آن می‌شود.

مطابق شکل (۱۰) نمونه طرح‌های اختلاط BSC۷۵-۴، SC۷۵-۴، BSC۷۵-۸ و SC۷۵-۸ با ترکیب ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی به ترتیب چگونگی مقاومت کششی را نشان می‌دهد. در نمونه طرح‌های BSC۴-۵۰، SC۵۰-۸، BSC۵۰-۸ و SC۵۰-۸ با ترکیب ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره به ترتیب از مقاومت کششی کم به زیاد نمایش داده شده است. عوامل زیادی از جمله نوع سنگدانه، نحوهٔ نوع توزیع آنها در بتن، تعداد فضاهای خالی و اندازهٔ آنها و همچنین پیوستگی بین خمیر ملات و سنگدانه‌ها بر مشخصات مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند. به طور کلی مقاومت کششی به یک‌پارچگی ماتریس مواد و چسبندگی بین خمیر ملات و سنگدانه‌ها وابسته است. مقاومت پایین خمیر ملات و اتصال ضعیف سنگدانه‌ها به آن در بتن سخت شده به دلیل مقدار بالای پودر کائولن نسبت به سرباره پدید می‌آیند و مقاومت کششی بتن را کاهش می‌دهند. به علاوه تعداد فضاهای خالی و اندازه آن‌ها، هوای بین ذرات و وجود ریز ترک‌ها با نسبت پودر کائولن به سرباره ارتباط مستقیم دارند و بر مقاومت کششی بتن تأثیر می‌گذارند. کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح BSC۷۵-۴ و بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح S۸ بوده است.

در مقایسهٔ نمونه طرح‌های اختلاط، زمانی که نسبت پودر کائولن ۵۰٪ و سربارهٔ ۵۰٪ باشد مقاومت بالاتری نسبت به نمونه طرح‌های اختلاط پودر سرامیک کائولن ۷۵٪ و سربارهٔ ۲۵٪ مشاهد می‌شود. به جز نمونه طرح اختلاط BSC۵۰-۴ در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان داد. علت آن به طرح ترکیبی ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ سرباره و اثر منفی مقدار اضافه پودر کائولن بر روی مقاومت کششی مرتبط است؛ به طوری که در سن ۲۸ روز واکنش پوزولانی کائولن و سرباره و تولید ژل C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) باعث افزایش مقاومت کششی نمونه-های ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره شده است. نکتهٔ قابل توجه در مورد نمونه طرح BSC۷۵ در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح BSC۷۵-۸ نسبت به نمونه طرح BSC۷۵-۴ مقاومت بالایی داشت؛ اگر چه در هر دو از پلیمر بوتادین استایرن رابر استفاده شده بود. در مقایسهٔ نمونه‌های طرح BSC۵۰ در مولار ۴ و ۸ شاهد مقاومت بالاتری در نمونه طرح BSC۵۰-۸ بودیم. نکتهٔ جالب توجه در آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی در دو نمونه طرح BS۸ و BSC۵۰-۸ این است که در نمونه ۸-۵۰ BSCبا وجود پلیمر و نسبت ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره، مقاومت تقریبا یکسانی با نمونه طرح BS۸ دیده شد. علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و تأثیر مقدار ۵۰٪ پودر کائولن نسبت به سرباره است. همچنین تغییر جزئی ناشی از وجود پلیمر روی مخلوط، قابل توجه نبود.

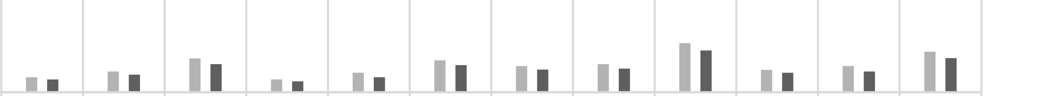


شکل ۱۰ مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی

با توجه به شکل (۱۰) در مورد نمونه‌های طرح شاهد به جز S۸ با وجود مواد چسبانندهٔ جامد، مقاومت کششی کمتری مشاهده شد. نمونه‌های طرح اختلاط ۸–SC۵۰، ۸–BSC۵۰ و ۴–SC۵۰ به ترتیب در مقایسه با نمونه طرح‌های اختلاط شاهد BS۴، S۴ و BS۸ مقاومت کمتری را از خود نشان دادند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که با توجه به نسبت ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش می‌یابد که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و در نتیجه افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها است.

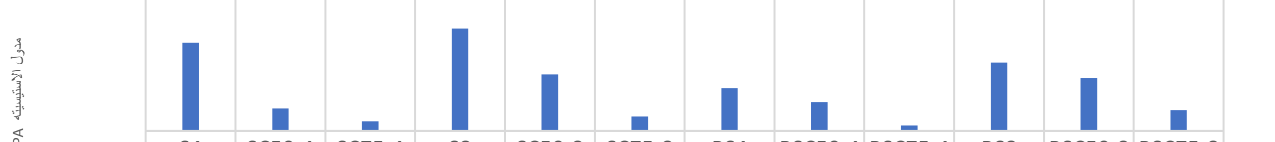
نتایج آزمایش زمان گیرش بتن (سوزن ویکات)

طبق روش ارائه شده در ASTM C ۴۰۳ [29] زمانی که مقدار مقاومت در برابر نفوذ ملات به ترتیب برابر ۳/۵ و ۲۷/۶ مگاپاسکال باشد، گیرش‌های اولیه و نهایی حاصل می‌گردد. در شکل (۱۱) مقدار گیرش‌های اولیه و نهایی مخلوط ملات‌های ژئوپلیمری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی سرباره از مقدار۵۰٪ به ۲۵٪ و پودر کائولن از ۵۰٪ به ۷۵٪ به جای سیمان، مقادیر گیرش اولیه و نهایی افزایش می‌یابد؛ زیرا پودر کائولن در ابتدا از نظر شیمیایی فعال نیست و پس از هیدراتاسیون سرباره و تولید کلیسم هیدروکسید است که می‌تواند فعالیت پوزولانی خود را آغاز کند [35]. در واقع چون با افزایش پودر کائولن مقدار سربارهٔ مخلوط کاهش می‌یابد، زمان بیشتری لازم است که بتن جوان دارای سربارهٔ کمتر در برابر نفوذ مشخصی از خود مقاومت نشان دهد. البته با افزایش مقدار پودر کائولن و کاهش مقدار سرباره، نسبت فوق روان‌کننده به سرباره افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به عنوان دلیل افزایش زمان گیرش با افزایش مقدار پودر کائولن عنوان شود. زمان گیرش اولیه ملات‌های ژئوپلیمری بین ۱۱۵ تا ۴۴۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی بین ۱۳۵ تا ۵۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شده است. به طوری که هر چه مقادیر چسب ژئوپلیمری، شامل سرباره و محلول‌های شیمیایی بیشتر باشد، زمان گیرش کمتری لازم است. دلیل این امر افزایش دمای تولید شده بر اثر بیشتر بودن چسب ژئوپلیمری است، به طوری که با افزایش دمای مخلوط به سبب اضافه شدن مواد اولیه شیمیایی، فرآیند واکنش‌های ژئوپلیمری تسریع می‌یابد و زمان گیرش آن کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش با افزودن میزان پودر کائولن ۷۵٪ و سرباره ۲۵٪ بین دو طرح اختلاط SC۵۰ و SC۷۵ در مولار۴، میزان گیرش اولیه بتن حدودا از ۳ دقیقه به ۵ دقیقه و گیرش نهایی بتن تقریبا از ۴ دقیقه به ۶/۵ دقیقه افزایش داشته است. علت این تفاوت در این است که فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به شدت به دمای مخلوط وابسته است و در زمان‌های اولیه دمای مخلوط بسیار بالاست، اما پس از گذشت حدود یک ساعت از ساخت آن و با کاهش دما این واکنش‌ها بسیار کند می‌شود. افزایش پودر کائولن موجب کاهش میزان مواد شیمیایی لازم برای سرباره شده و فرآیند تشکیل ژئوپلیمر را با سختی روبه‌رو می‌کند و زمان گیرش نهایی افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی کاهش می‌یابد. مشاهدات حین ساخت نشان داد که بین دو محلول ساخته شدهٔ شیمیایی، سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات، محلول اول بیشترین دما را داشت. علت کاهش زمان گیرش، به افزایش دمای ایجادشده مربوط است. دمای اولیه محلول سدیم هیدروکسید مولار ۴، در حدود ۷۵°C و با غلظت مولار۸، نزدیک به ۹۰°C است. به این ترتیب کاهش زمان گیرش به علت افزایش دمای مخلوط، ناشی از افزایش غلظت می‌باشد.



	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
گیرش اولیه (دقیقه)	135	185	295	115	160	285	240	250	440	205	220	360
گیرش نهایی (دقیقه)	160	220	355	135	205	335	275	295	515	235	275	425

شکل ۱۱ مقایسه زمان گیرش (ویکا) ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی در سن ۲۸ روز



	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
28 روزه	26/41	6/73	2/82	30/63	16/86	4/26	12/73	8/61	1/62	20/43	15/78	6/23

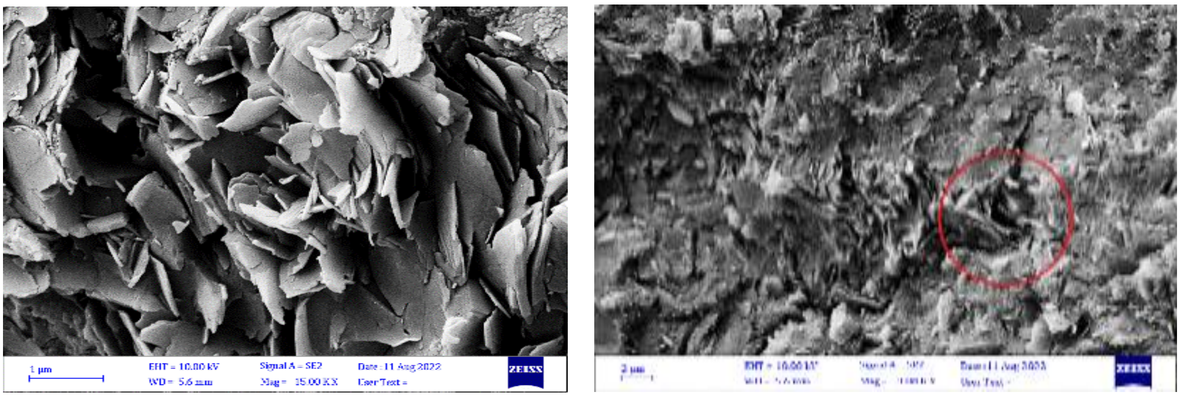
شکل ۱۲ مدول الاستیسیته ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی در سن ۲۸ روز

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته و میزان تأثیر پودر کائولن و سرباره بر نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۱۲) ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن باعث افت مدول الاستیسیته شده است. با توجه به نتایج شکل (۱۲)، کمترین مقاومت مدول الاستیسیته ۲۸ روزه مربوط به نمونه طرح BSC۷۵-۴ و بیشترین مقاومت مدول الاستیسیته ۲۸ روزه مربوط به نمونه طرح S۸ اختصاص یافت. در نمونه طرح BSC۷۵-۴ با افزودن ۷۵٪ پودر کائولن درکنار ۲۵٪ سرباره و پلیمر (SBR)، افت مقاومت بسیاری مشاهده شد. در مقایسهٔ نمونهٔ شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ حاصل شد زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می‌کند. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت مولار ۸ مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت مدول الاستیسیته بهتری را ارائه می‌کنند. زمانی که در طرح اختلاط از پلیمر استفاده شد در مقایسهٔ دو نمونه طرح BSC۵۰-۸ با SC۵۰-۸ در سن ۲۸ روز مقاومت بهتری ایجاد شد. این امر به مقدار اضافی پودر کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۵۰٪ کائولن نسبت به نمونه طرح شاهد ارتباط داشت که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خود خشکیدن بتن شده است. البته نمونه طرح SC۵۰-۸ در سن ۲۸ روز مقاومت بهتری را نشان داد؛ چون افت نمونه طرح BSC۵۰-۸ در سن ۲۸ روز ناشی از وجود پلیمر (SBR) است. در مقایسهٔ دو نمونه طرح شاهد S۴ و S۸، نمونه طرح S۸ به علت سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات در مولار ۸ بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است.

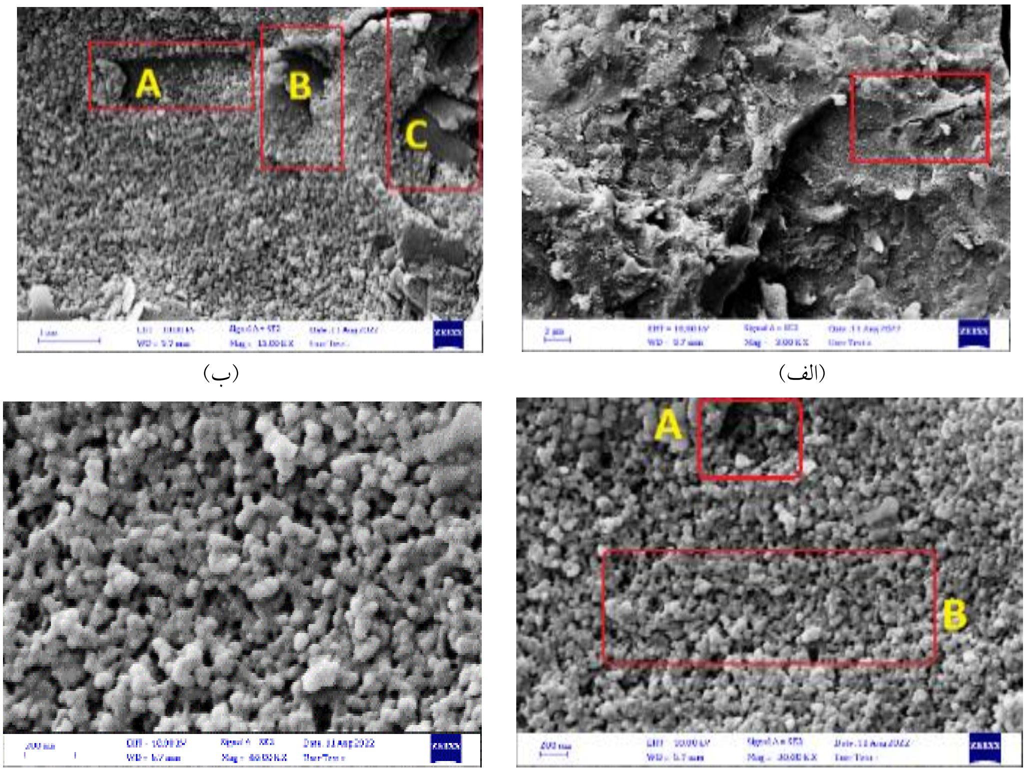
نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)

در شکل (۱۵-۱۳) تصاویر SEM از سطح شکست ۲۸ روزهٔ نمونهٔ BSC۵۰-۴ حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و پلیمر(SBR) ارائه شده است. در این تصاویر ساختار ترکیبات مختلف، ترک‌ها و حفره‌ها نیز مشاهده می‌شود. نمونهٔ BSC۵۰-۴ دارای ساختارهای منسجم و متراکم C-A-S-H و C-S-H است. در طی فرآیند انحلال برخی از یون‌های Al و Ca آزاد می‌شود و نانو ساختار C-A-S-H در حین واکنش محلول قلیایی به وجود می‌آید [36]. با مقایسهٔ این تصاویر می‌توان استنباط نمود که چسبندگی بین پودر کائولن و سرباره در نمونهٔ بتن ژئوپلیمری مطلوب است. از طرف دیگر فاز زمینه حاوی پودر کائولن بر روی سطح سرباره الحاق یافته و سطح شکست کائولن ناهموار است؛ اما در نمونه‌هایی که پودر کائولن درون زمینه توزیع نشده‌اند، سطوح سرباره هموار و عاری از هر گونه رزین زمینه روی آن است که حاکی از چسبندگی ضعیف بین زمینهٔ پلیمری و پودر کائولن است.



(الف) (ب)

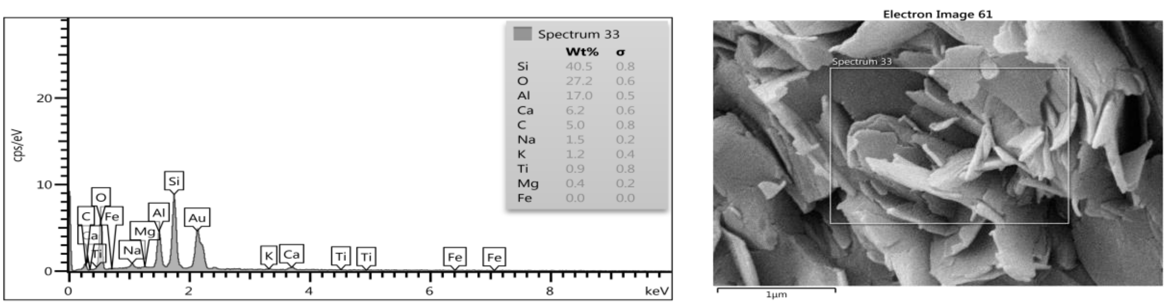
شکل ۱۳ عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) از نمونهٔ BSC۵۰-۴



(الف) (ب)

(ج) (د)

شکل ۱۴ عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) از نمونهٔ BSC۵۰-۴



شکل ۱۵ آنالیز EDS نمونه طرح BSC۵۰-۴ حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی و پلیمر استایرن بوتادین رابر (SBR)

در شکل (۱۳) و (۱۴) تصویر میکروسکوپی از سطح شکست زمینه پودر کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ و پلیمر(SBR) نشان داده شده است. در این رابطه ناهمواری‌هایی در سطح شکست ملاحظه می‌گردد و انحراف ترک ایجاد شده بر اثر آزمایش مقاومت مشاهده می‌شود که از دلایل اصلی افزایش جذب انرژی در نمونه‌های ژئوپلیمری شامل پوزولان پودر کائولن به شمار می‌رود. باتوجه به شکل (۱۳-الف) کلوخه‌هایی از نانوصفحات گرافن ناشی از توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی تشکیل شده است که این نقاط منجر به ایجاد تمرکز تنش و افت خواص مکانیکی می‌شود.

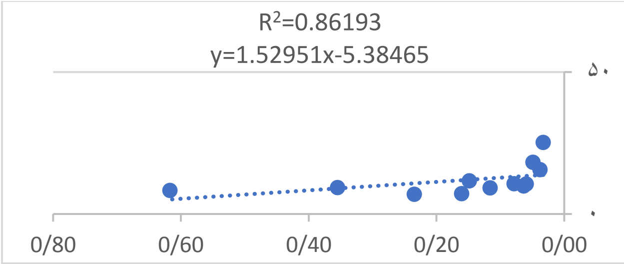
در ارتباط با نمونۀ چند مقیاسی حاوی پودر کائولن، سرباره و پلیمر، چسبندگی خوبی بین پودر کائولن و زمینه مشاهده می‌گردد و ترک به جای رشد در امتداد فصل مشترک در داخل زمینه اشاعه پیدا کرده است. این بدان معناست که در ارتباط با نمونه‌های چندمقیاسی، اشاعۀ ترک در زمینه مکانیزم غالب شکست است. حضور نانوذرات کربنات کلسیم باعث انحراف مسیر رشد ترک در زمینه می‌شود و به همین دلیل سطح شکست بخش زمینه نمونۀ چندمقیاسی بر خلاف نمونه شاهد ناهموار است [37,38].

در ارتباط با نمونۀ ۴-BSC۵۰، چسبندگی مناسبی بین پودر کائولن و زمینه ژئوپلیمری دیده می‌شود. در شکل (۱۴-ب) حضور آگلومره‌های نانوذرات در نمونۀ ۴-BSC۵۰ مشهود است که این آگلومره‌ها به عنوان نواحی تمرکز تنش در زمینه عمل کرده و به ایجاد و اشاعه ترک و افت خواص مکانیکی کمک شایانی می‌کند [37]. این مشاهدات با نتایج آزمون‌های مکانیکی گزارش شده در بخش قبلی تطابق دارد. میزان درصد وزنی عناصر در بتن ژئوپلیمری در شکل (۱۵) توسط آزمون EDX اندازه‌گیری شد.

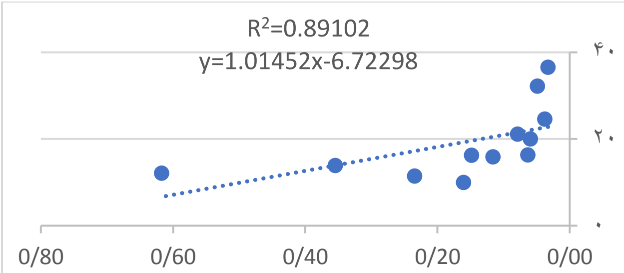
نانوساختار C-S-H و C-A-S-H دارای تنوع گسترده‌ای است و با توجه به چگونگی تغییرات نسبت Ca/Si، ساختار سیلیکات و محتویات Si-OH و Ca-OH به هم مرتبط می‌شوند. به طور کلی فرض می‌شود نانو ساختار C-S-H همراه با نانو ساختار C-A-S-H در طی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون برای ایجاد پیوند محکم‌تر و برای از بین بردن منافذ در ژئوپلیمرها به وجود می‌آید. با توجه به نسبت وزنی عناصر نمونه‌های ژئوپلیمری با آزمون EDX، می‌توان نتیجه گرفت محیط مناسبی برای تشکیل نانوساختارهای C-S-H وجود دارد. پژوهش‌ها نشان داده که با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت تبخیر شدن آب فیزیکی، ساختار نمونه تراکم بیشتری پیدا کرده است و با رشد نانوساختارهای C-A-S-H و C-S-H این میکرو ترک‌ها از بین رفته است [39,40]. نسبت بالای Si/Al ژئوپلیمریزاسیون بسیار مناسبی را در ترکیب نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به مقدار Ca موجود می‌توان نتیجه گرفت که ساختار N-A-S-H تشکیل شده در ژئوپلیمر، در عین داشتن مشخصات مقاومتی مناسب، ترکیبات قلیایی ناپایدار در PH های کمتر از ۱۲ محسوب می‌شود، با حضور مقدار مناسب Ca ناشی از وجود کائولن، تبدیل به ترکیبات پایدار و مقاوم Na C-A-S-H با مقدار پایین کلسیم یا C-A-S-H شده‌اند که این پدیده از تفاوت‌ها و برتری‌های ملات‌ها و بتن ژئوپلیمری بر مواد فعال شده قلیایی (Alkali-Activated Materials) است. در شکل (۱۳) و (۱۴) برخی ذرات کائولن واکنش نداده نیز ملاحظه می‌شوند. در حضور مقادیر بالای سیلیس و کلسیم در برخی مطالعات تشکیل ژل C-S-H نیز دیده شده است که می‌تواند برخی ساختارهای آمورف در اطراف ذرات کائولن را توجیه کند. در شکل (۱۴-الف و ب) ناحیه اتصال بین سنگدانه و خمیره مشاهده می‌شود. چنانکه در تصویر مشخص است، جداشدگی در برخی نواحی ITZ قابل تشخیص است و این امر می‌تواند به وجود آب در این نواحی مربوط باشد که بعد از قرارگیری در حرارت به علت فشار ناشی از خروج بخار آب باعث جداشدگی و ترک در ناحیه انتقال شده است که می‌توان آن را به واکنش‌های کائولن در ساختار نمونه نسبت داد.

همبستگی بین نتایج آزمایش‌ها

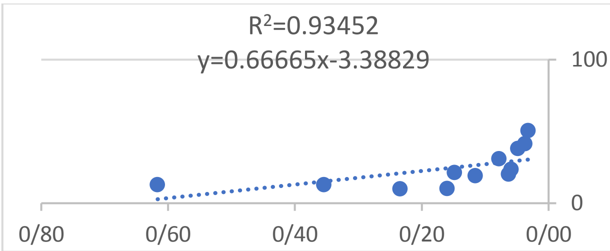
در این قسمت با مقایسۀ نتایج آزمایش‌های مختلف سعی داریم رابطۀ بین آن‌ها و میزان همبستگی نتایج آزمایش‌ها را تعیین کنیم. تعیین ارتباط میان آزمایش‌های مختلف ما را قادر می‌سازد تا با آگاهی از بعضی خصوصیات بتن، پیش‌بینی نزدیکی نسبت به دیگر خصوصیات آن داشته باشیم. به این منظور نتایج آزمایش‌ها در سنین مختلف با هم مقایسه شده‌اند و ارتباط میان داده‌ها با عبور خطی که کمترین پراکندگی را نسبت به داده‌ها داشته باشد مشخص شده است. به این منظور از بین خطوط عبوری خطی که بیشترین R^2 را داشته باشد انتخاب شد. ارتباط بین نتایج مختلف به دست آمده در آزمایش‌های انجام شده در شکل‌های (۲۱-۱۷) دیده می‌شود.



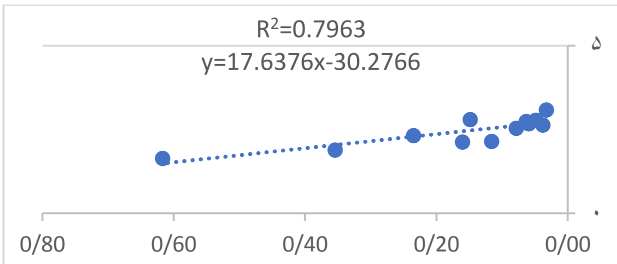
شکل ۱۷ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ژئوپلیمری



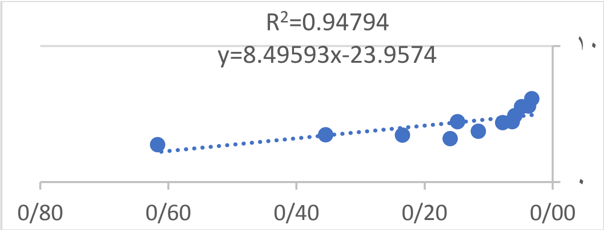
شکل ۱۸ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری



شکل ۱۹ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۹۰ روزه ملات ژئوپلیمری



شکل ۲۰ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری



شکل ۲۱ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت خمشی ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری

ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری (۷، ۲۸ و ۹۰) روزه در شکل (۱۹-۱۷) ارائه شده است. ضریب همبستگی مدول الاستیسیته ۲۸ روزه با مقاومت فشاری ۹۰ روزه عملکرد مطلوبی را نشان داد. دلیل آن رخ دادن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری است. با توجه به شکل (۲۰) ضریب همبستگی بالایی بین مدول الاستیسیته و مقاومت کششی ۲۸ روزه برقرار نیست. مطابق شکل (۲۱) ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی ۲۸ روزه به دلیل فرآیند هیدراتاسیون مطلوب نتیجهٔ بهتری از خود نشان داد.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با مطالعه بر روی اثر ملات‌های ژئوپلیمری بر مبنای کائولن و سرباره به صورت انفرادی و ترکیبی در چند مولار مختلف نتایج زیر به دست آمد:

نتایج نمونه طرح اختلاط ۵۰٪ پودرکائولن و ۵۰٪ سرباره، نسبت به نمونه طرح اختلاط ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره، مقاومت فشاری و خمشی بهتری را در بر داشت.

نمونه‌های طرح SC۵۰-۴ و BSC۵۰-۸، با توجه به استفاده از پلیمر در نمونه BSC۵۰-۸، مقاومت خمشی هر دو نمونه یکسان و عدد ۴/۴۳ مگاپاسکال بدست آمد که عدم تأثیرگذاری پلیمر را در مقاومت خمشی بیان می‌کند.

نمونه طرح های شاهد S۴ و BS۸ به سبب مواد چسبانندهٔ جامد در نمونهٔ BS۸، مقاومت خمشی تقریبا یکسانی مشاهده شد.

با توجه به استفاده از ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره در دو نمونه طرح SC۷۵ در مولار ۴ و ۸، مقاومت خمشی این دو تفاوت معناداری با هم نداشت.

در نتایج نمونه‌ها با نسبت پودر سرامیک کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه طرح‌های حاوی پودر کائولن ۷۵٪ و سرباره ۲۵٪ مشاهده می‌شود؛ بجز نمونه طرح اختلاط BSC۵۰-۴ در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان می‌دهد. نکتهٔ قابل توجه در مورد نمونه طرح BSC۷۵ در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح BSC۷۵-۸ نسبت به نمونه طرح BSC۷۵-۴ مقاومت بالایی داشت؛ اگر چه در هر دو از پلیمر بوتادین استایرن رابر استفاده شده بود.

با توجه به نسبت ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و مدت زمان عمل آوری، مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش می‌یابد که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و در نتیجه افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها است. نکته حائز اهمیت در آزمایش مقاومت کششی دو نمونه طرح BS۸ و BSC۵۰-۸ این است که در نمونه BSC۵۰-۸ با وجود استفاده از پلیمر بوتادین استایرن رابر و نسبت ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره، مقاومت تقریبا یکسانی نسبت به نمونه طرح BS۸ دیده می‌شود.

در صورت وجود کائولن نتایج به دست آمده از آزمایش زمان گیرش بتن حاکی از افزایش زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن است. با افزایش درصد کائولن از ۵۰٪ به ۷۵٪ مقدار کندگیری مخلوط افزایش می‌یابد. در تمام آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مقدار و نوع فوق روان‌کننده مصرف شده ثابت نبوده است. نظریهٔ غالب پژوهشگران آن است که افزایش همزمان میزان کائولن و فوق روان‌کننده در مخلوط نیز بر میزان کندگیری بتن می افزاید.

افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن باعث افت مدول الاستیسته شده است؛ به طوری که با افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن از ٪۵۰ به ۷۵٪ در نمونه طرح BSC۷۵-۴ مدول الاستیسیته (۱/۶۲ Gpa) را نشان می‌دهد. همچنین ارتباط مشخصی بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیتهٔ بتن ژئوپلیمری مشاهده شد.

در مقایسهٔ نمونهٔ شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ حاصل شد؛ زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می‌کند. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت مدول الاستیسیته مطلوبی را ارائه می‌کنند.

با توجه به نتایج بدست آمده ترکیب کائولن و سرباره با درصد مساوی نسبت به طرح‌های شاهد توصیه می‌شود؛ چرا که ٪۷۵ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره باعث افت خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری می‌شود.

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) نشان داد که قدرت چسبندگی بین سرباره و پودر کائولن نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی بتن‌های تحت آزمایش مقاومت دارد.

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در ارتباط با نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن، به علت آگلومره شدن نانوذرات، افت خواص مکانیکی در نانوذرات مشاهده شد که به دلیل تجمع نانوذرات در این درصد وزنی است.

با آزمایش (SEM) در نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن، به علت آگلومره شدن نانوذرات، افت خواص مکانیکی در آنها مشاهده شد که به دلیل تجمع نانوذرات در این درصد وزنی است.

نتایج حاصل از بررسی های ریزساختاری حاصل از تصویربرداری SEM بر روی نمونه‌های بتنی، در هماهنگی و همپوشانی با نتایج سایر آزمون‌ها در این پژوهش قرار داشتند.

سپاسگزاری

در پایان از مدیران محترم آزمایشگاه خاک سنجش بنیان سازه بابت ارائه تجهیزات و همکاری‌های ارزنده کمال تشکر را دارم.

واژه نامه

GGBFS	سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی
XRF	آنالیز طیف سنج فلورسانس اشعه ایکس
Binder Solid	پودر چسباننده جامد
ASTM	انجمن آمریکایی آزمایش و مواد
SBR	استایرن بوتادین رابر
Ceramic Powder	پودر سرامیک
Sand	شن
Alkali-Activated Materials	مواد فعال شده قلیایی
SEM	ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی

Slag	سرباره	MPa	مگاپاسکال
EDS-EDX	طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس	GPa	گیگاپاسکال
ITZ	ناحیه انتقال در بتن		
NaOH	هیدروکسید سدیم		
Sodium Silicate	سدیم سیلیکات		

سپاسگزاری

مراجع

[1] A. A. Ramezanianpour, A. Kazemian, M. A. Moghaddam, F. Moodi, A. M. Ramezanianpour, "Studying effects of low-reactivity GGBFS on chloride resistance of conventional and high strength concretes," *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 2597-2609, (2016). https://doi.org/10.1617/s11527-015-0670-y.

[2] A. A. Ramzanianpour, A. Zulfiqaransab, F. Bahmanzadeh, A. M. Ramzanianpour, "Assessment of high performance concrete containing mineral admixtures under sulfuric acid attack," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1), pp.121-138. (2018). https://doi.org/10.22060/ceej.2016.696.

[3] R. F. M. و Bakker, About the cause of the resistance of blast furnace cement concrete to the alkali-silica reaction. In *Proceedings, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete (Cape Town, 1981), National Building Research Institute, CSIR, Pretoria* (Vol. 5252, p. 29). (1981, March).

[4] S. A. Bernal, R. Mejia de Gutiérrez, A. L Pedraza, J. Provis, E. D. Rodriguez, S. Delvasto, "Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 1, pp. 1-8, (2011).

[5] C. Shi, P. Krivenko, D. Roy, "Alkali-Activated Cements and Concretes," *Taylor & Francis Group an informa business*, p. 392, (2006). https://doi.org/10.1201/9781482266900.

[6] S. D. Wang, X. C. Pu, K. L. Scrivener, P. L. Pratt, "Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems," *Advances in Cement Research*, vol. 7, no. 27, pp. 93-102, (1995).

[7] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement," *Applied Clay Science*, vol. 47,no. 3-4, pp. 271-275. (2010). doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.002.

[8] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, N. B. Singh, "Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 685-691, (2015). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009.

[9] S. Ramasamy, K. Hussin, M. M. A. B. Abdullah, C. M. R. Ghazali, M. Binhussain, A. V. Sandu, "Interrelationship of kaolin, alkaline liquid ratio and strength of kaolin geopolymer," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 133, No. 1, p. 012004, (2016). https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012004.

[10] K. Mermerdaş, S. Manguri, D. E. Nassani, S. M. Oleiwi, "Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar," *Engineering Science and Technology, an International Journal*,

vol. 20, no. 6, pp. 1642–1652, (2017). doi:10.1016/j.jestch.2017.11.009.

[11] J. Ahmad, “Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolemer concrete,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 1306-1313, (2017).

[12] Y.J., Patel, N. Shah, “Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 1-12, (2018). doi:10.17485/ijst/2018/v11i1/117698.

[13] A. C. Bhogayata, N. K. Arora, “Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex,” *Construction and Building Materials*, vol. 180, pp. 382-395, (2018). doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.175.

[14] L. K., Aggarwal, P. C., Thapliyal, S. R. Karade, “Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 379-383, (2007). doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.007.

[15] A. R. Bagheri, S. Hashemi, “Influence of (SBR) Latex and Silica Fume on Properties and Performance of Cement-based Repair Concretes,” *Journal of Civil Engineering and Managemen*, vol. 26, no. 2, pp. 33-47, (2008).

[16] B. Liu, J. Shi, M. Sun, Z. He, H. Xu, J. Tan, “Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent,” *Journal of Building Engineering*, vol. 31, no. 9, p. 101337, (2020). doi:10.1016/j.jobe.2020.101337.

[17] Y.K. Jo, “Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier,” *Construction and Building Materials*, vol. 242, p. 118134, (2020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118134.

[18] H. Chehrazi Sefiddashti, H. Madani, A. Saeedikia, “Investigation and comparsion of the properties of cement-based mixtures containing different type of polymers,” *Sharif Journal*, vol. 36.2, no. 3.2, pp.135-145, (2020).

[19] F, Matalkah, R, Aqel, A. Ababneh, “Enhancement of the mechanical properties of kaolin geopolymer using sodium hydroxide and calcium oxide,” *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp.164-171, (2020). doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.218.

[20] N. N. Greenwood, A., EarnShow, *Chemistry of the Elements*, 2nd Edition, Elsevier, November 11, (1997).

[21] ASTM C33/C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, *ASTM Internationa West Conshohocken, PA*, vol. 04.02, p.8, (2003).

[22] I. Luhar, S. Luhar, M. M. A. B. Abdullah, M. Nabiałek, A.V. Sandu, J. Szmidla, A. Jurczyńska, R. A. Razak, I. H. Aziz, N. H. Jamil, L. M., Deraman, “Assessment of the suitability of ceramic waste in geopolymer composites: An appraisal,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 3279, (2021). doi:10.3390/ma14123279.

[23] I. A. Bello, O. Olalusi, F. Olutoge, “Effect of Salt Water on the Compressive Strength of Ceramic Powder Concrete,” *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 6, no. 4, pp. 158-163, (2017).

[24] S. Yaseri, G. Hajiaghaei, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, R. Farokhzad, “The role of synthesis parameters on the

workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 534-545, (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102.

[25] H, Peng, C, Cui, C. S. Cai, Y. Liu, Z. Liu, "Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 263-273, (2019). doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.090.

[26] ASTM C109 / C109M-20, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *ASTM International West Conshohocken, PA*, vol. 04.01, p. 11, (2020).

[27] ASTM C293-08, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," *Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials*, vol. 04.02, p. 3, (2010).

[28] American Society for Testing and Materials. Committee C-1 on Cement. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, 2013. https://www.wbdg.org/ffc/army-coe/standards/crd-c260.

[29] ASTM Committee C-09 on Concrete and Concrete Aggregates. *Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance*. ASTM international, (2008).

[30] ASTM C469/C469M-22, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, vol. 04.02, p. 6, (2022).

[31] M., Alizadeh Zolbin, S., Ghofrani, and A., Almasi, "Basics of Sample Preparation for Scanning Electron Microscope (SEM)," in "Specialized Quarterly of Iranian Laboratory Science", Iran, Tehran, Materials Engineering and Metallurgy, Materials and Energy Research Institute, (2013).

[32] M. Elchalakani, M.,Dong, A. Karrech, G. Li, M.S. Mohamed Ali, T. Xie, B. Yang, "Develiopment of Fly Ash-and Slag-Based Geopolymer Concrete with Calcium Carbonate or Microsilica," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 12, pp. 04018325-1 - 04018325-14, (2018). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002527.

[33] M. Cyr, R. Idir, T. Poinot, "Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet," *Journal of Materials Science*, vol. 47, pp. 2782–2797, (2012). doi:10.1007/s10853-011-6107-2.

[34] R., Prasanna Venkatesan, and K.C., Pazhani, "Strength and durability properties of geopolymer concrete made with graulated blast furnace slag and black rice husk ash, *KSCE Journal of civil engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 2384-2391, (2016). https://doi.org/10.1007/s12205-015-0564-0.

[35] A. M. Neville, Properties of Concrete, Vol. 4. London: Longman, (1995).

[36] M. A, Yazdi, M, Liebscher, S, Hempel, J, Yang, V. Mechtcherine, "Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature," *Construction and Building materials*, vol. 191, pp. 330-34, (2018).

[37] N, Jamali, A, Rezvani, H, Khosravi, E, Tohidlou, "On the Mechanical Behavior of Basalt Fiber/Epoxy Composites filled with silanized graphene oxide nanoplatelets," *polmer composites*, vol. 39, pp. E2472-E2482, (2018).

[38] H. Khosravi, R. Eslami Farsani, H. Ebrahimnezhad Khaljiri, "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 3, no. 2, pp. 187-194, (2016).

[39] M., Aryanpour, M. Amiri, "The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)," *Concrete Research Quarterly Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 69-80, (2019).

[40] M. Amiri, & M. Aryanpour, "The Effect of High Temperatures on the Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete," *Amirkabir Journal of Civil Engineerin*, vol. 52, no. 12, pp. 2987-3002, (2021).